
انجمن مهندسی روسازی ایران


انجمن بتن ایران

نشریه مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/



مطالعه عددی خاکریزهای متکی بر شمع‌های پیچی و بتنی تحت بارگذاری ترافیکی راه‌آهن*

مقاله پژوهشی

محمدامین مشایخی(۱) محمدرضا خانمحمدی(۲)

DOI: 10.22067/jfcei.2023.80622.1209

چکیده امروزه استفاده از المان‌های سازه‌ای مانند شمع‌ها، به عنوان یک راه‌حل مؤثر در بهبود عملکرد کلی یک سیستم خاکریزی به لحاظ پایداری و کنترل نشست در نظر گرفته می‌شوند. در سال‌های اخیر استفاده از شمع‌های پیچی به دلیل عملکرد مناسب تحت بار فشاری و کششی، نصب سریع و آسان شمع و حذف مشکلات بتن‌ریزی مورد توجه قرار گرفته است. این مقاله یک بررسی عددی از مقایسه عملکرد خاکریزهای متکی بر شمع‌های پیچی و بتنی ساخته شده بر روی خاک نرم، ارائه می‌دهد. برای این منظور مدل‌های المان محدود سه بعدی به‌طور جداگانه از خاکریزهای متکی بر شمع‌های پیچی و بتنی در حالی که طول و قطر شفت شمع‌های آن‌ها یکسان است، در نرم‌افزار آباکوس توسعه داده می‌شوند. نتایج مدل‌سازی های عددی با مشاهدات میدانی و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی دیگر پژوهشگران اعتبارسنجی می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد استفاده از شمع‌های پیچی در مقایسه با شمع‌های بتنی، باعث کاهش قابل قبول نشست در خاکریز و خاک نرم پی خواهد شد، و حرکات جانبی خاکریز را کنترل می‌کند. همچنین توزیع نیروی محوری در شمع حاکی از آن است که شمع پیچی ظرفیت باربری بیشتری نسبت به شمع بتنی دارد و شمع‌ها به صورت اصطکاکی رفتار می‌کنند. حضور کلاهک شمع، باعث کنترل قابل قبول نشست‌ها در سیستم خاکریز متکی بر شمع می‌شود و ظرفیت باربری بیشتری در شمع بسیج خواهد شد. همچنین اضافه کردن پره به بدنه شمع در فواصل مختلف، تأثیر چشمگیری در بهبود عملکرد سیستم خاکریزهای متکی بر شمع نمی‌گذارد و حتی ممکن است باعث افزایش نشست و پایین آمدن مکانیزم انتقال بار شود.

واژه‌های کلیدی نشست‌های کلی و تفاضلی، خاکریزهای متکی بر شمع، شمع‌های پیچی، ظرفیت باربری، مدل‌سازی عددی.

Numerical Investigation of Concrete and Helical Pile-supported Embankments Under Railway Traffic Loading

Mohammad Amin Mashayekhi Mohammadreza Khanmohammadi

Abstract *The use of structural elements such as piles are considered as an effective solution in improving the overall performance of an embankment system in terms of stability and settlement control. In recent years using helical piles has been considered due to their proper performance. This research presents a numerical investigation to compare the performance of embankments rested on concrete and helical piles. A 3D finite element models are developed separately in ABAQUS software for embankments based on helical and concrete piles while the length and diameter of their pile shafts are the same. The model was validated via comparing the obtained numerical results with the field and laboratory measurements (observation). The results show that the helical piles have significantly reduced the settlement in the embankments and the soft foundation soil and controlled lateral embankment displacement. Also, the distribution of axial force along the embedment depth of the pile indicates that the helical pile has higher bearing capacity than the concrete pile and behaves frictionally. The presence of the cap on the helical pile was also examined and the results show that it causes adequate control of the settlement in the embankment system and increases the bearing capacity of the piles. In addition, adding the blade to the pile body at different distances does not have a significant effect on improving the performance of the pile-supported embankment system while it could lead to embankment settlement and lower load transmission.*

Key Words Absolute and differential settlement, Pile-supported, Helical pile, Bearing Capacity, Numerical modelling.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۱۰/۲۵ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۴/۳می‌باشد.

(۱) دانشجو کارشناسی ارشد ، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.

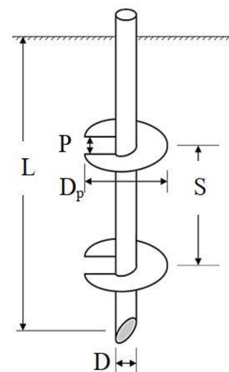
(۲) نویسندهٔ مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

Email: mkhanmohammadi@iut.ac.ir .

مقدمه

ساخت خاکریزها بر روی خاک‌های رسی نرم به دلیل ظرفیت باربری پایین، نشست پذیری بالا و ناپایداری شیب خاکریز، برای مهندسان ژئوتکنیک موضوعی چالش برانگیز است. روش‌های مختلفی برای بهود خواص مهندسی این نوع خاک‌ها استفاده شده است. خاکریزهای متکی بر شمع به دلیل ساخت سریع و ارزان و کاهش نشست‌های کلی و تفاضلی در مقایسه با سایر روش‌های سنتی بهسازی خاک‌های نرم، بیشتر استفاده می‌شود [1]. تحقیقات مختلفی بر روی خاکریزهای متکی بر شمع و بررسی عوامل موثر بر عملکرد آن‌ها تحت بارهای مختلف استاتیکی و دینامیکی انجام شده است. تمرکز اکثر مطالعات انجام شده بر روی استفاده از شمع‌های بتنی که به صورت درجا یا پیش‌ساخته استفاده می‌شوند، است. فام و دیاز (Pham and Dias) (۲۰۲۱) [2] به ارائه یک مطالعه پارامتریک گسترده با استفاده از مدل‌سازی عددی سه‌بعدی بر روی خاکریزهای تقویت شده با شمع و ژئوسنتتیک پرداختند. تحلیل عددی بر روی خاکریز چسبنده و غیرچسبنده به‌منظور تاکید بر انسجام خاک بر کارایی عملکرد خاکریز در انتقال بار و نشست انجام شده‌است. ناوین کومار (Naveen kumar) و همکاران (۲۰۲۰) [3]، در پژوهشی بر روی عملکرد خاکریزهای متکی بر شمع‌های بتنی تحت بار ترافیکی راه‌آهن پرداختند؛ در این مطالعه مدول الاستیسیته شمع و خاکریز، زاویه اصطکاک داخلی مصالح خاکریز و فاصله شمع‌ها مطالعه شد و اثرات آن‌ها بر عملکرد سیستم خاکریز متکی بر شمع مورد بررسی قرار گرفت. وو (Wu et el) و همکاران [4] (۲۰۱۹) به‌مطالعه میدانی یک سیستم خاکریزی متکی بر شمع پرداختند. خاکریز با ارتفاع ۴۰ متر بر روی شمع‌های پیش‌تنیده بتنی ساخته شده بود. مجموعه‌ای از آزمایش‌های میدانی شامل بارگذاری سر شمع، نشست و جابجایی‌های جانبی انجام شد. بهاسی و راجاگوپال (Bhasi and Rajagopal) (۲۰۱۵) [5]، با بررسی عددی عملکرد خاکریزهای متکی برشمع‌های با باربری انتهایی و اصطکاکی، نشان دادند که استفاده از شمع‌های اصطکاکی می‌تواند به طور قابل توجهی نشست را کاهش دهد و مشخص شد که بار خاکریز منتقل شده از شمع به خاک پی، به طور قابل ملاحظه‌ای بستگی به طول شمع دارد. جیانگ (Jiang et el) و همکاران (۲۰۱۴) [6] یک تجزیه و تحلیل عددی از یک خاکریز با تکیه گاه دال- شمع برای راه‌آهن سریع السیر پکن-تیانجین در چین را ارائه می‌دهند. در این پروژه از شمع‌های خاکستر-شن سبک (Cement-flyash-gravel) (CFG) استفاده شد و نتایج با داده‌های میدانی مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که ستون‌های (CFG) بیشتر بار خاکریز را حمل می‌کردند و ترکیب شمع‌های صلب و دال بتنی مسلح به طور قابل توجهی تنش‌های عمودی اعمال شده به خاک بین شمع‌ها را کاهش می‌دهد. براینکون و سیمون (Briancon and Simon) (۲۰۱۲) [7] و چن (Chen et el) و همکاران (۲۰۱۰) [8] به مطالعه تمام مقیاس عملکرد خاکریزهای متکی بر شمع در پروژه‌های میدانی پرداختند. نتایج نشان می‌دهد استفاده از شمع‌ها می‌تواند فشار اعمالی بر روی خاک نرم زیر خاکریز را کاهش دهد و سهم بار بیشتری بر روی شمع‌ها وارد شود. بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد که استفاده از شمع‌های پیچی در خاکریزهای متکی بر شمع نیازمند مطالعه بیشتری است. شمع پیچی یک سیستم پی عمیق ساخته شده از فولاد است و شامل یک یا چند صفحه باربر مارپیچ متصل شده می‌باشد که در فواصل مختلف در امتداد یک شفت مرکزی متصل شده‌اند. در شکل (۱) یک نمونه شمع پیچی با دو مارپیچ نمایش داده شده است. ابعاد قطر شفت (D) معمولا بین ۱۷۸ میلیمتر تا ۹۱۴ میلیمتر می‌باشد و قطر پره (DP) معمولا به اندازه ۲ تا ۳ برابر قطر صفحه مارپیچ است [9,10]. استفاده از شمع‌های پیچی به علت ظرفیت باربری بالا برای تحمل بار فشاری در کاربردهای مهندسی در سال‌های اخیر پیشرفت قابل توجهی داشته است. یک شمع پیچی می‌تواند در هر عمق و در هر زاویه ای (با توجه به شرایط خاک) از طریق نیروی محوری و گشتاور پیچشی که توسط یک موتور گشتاور هیدرولیکی به بالای شمع اعمال می شود، وارد زمین شود. مزایای استفاده از شمع‌های پیچی در مقابل شمع‌های بتنی عبارتند از: ۱. قابلیت حذف و نصب مجدد، ۲.کاهش خطرات حفاری و حذف مشکل بتن ریزی، ۳. سر و صدای کم و ایجاد ارتعاش حداقل و سازگاری بیشتر با محیط زیست، ۴. عدم ایجاد نخاله حین حفاری و قابلیت استفاده مجدد، ۵. استفاده در طیف وسیعی از خاک‌ها [11,12].

محققان مختلفی به مطالعه عملکرد شمع‌های پیچی پرداخته‌اند.الشربینی و النگار (Elsherbiny and El Naggar) (۲۰۱۳) [13] رفتار فشاری محوری شمع پیچی را در ماسه و خاک رس مطالعه کرده‌اند. آن‌ها روشی را برای طراحی شمع‌های پیچی با استفاده از نتایج مدل‌های عددی پیشنهاد کردند. همچنین پاوان کومار و همکاران (Elsherbiny and El Naggar) (۲۰۲۱) [14] به مقایسه عملکرد شمع‌های پیچی با شمع‌های بتنی تحت بار جانبی و محوری پرداختند.



شکل ۱ نمونه شمع پیچی دوپره

مرور ادبیات فنی نشـــان می‌دهد که رفتارخاکریزهای متکی به شـمع‌های پیچی نیازمند مطالعه بیشـتری اسـت و با توجه به مزایا ذکر شـــده شـــمع های پیچی می‌توان از آن‌ها به عنوان جایگزینی مناسب برای شمع‌های بتنی اسم برد. در این مطالعه با فرض یکســان بودن مشــخصــات ژئوتکنیکی خاک و شــرایط بارگذاری، عملکرد شـمع‌های پیچی و بتنی مقایسـه می‌شـود و سـاز و کار انتقال بار در خاکریز و همچنین میزان نشسـت‌ها و جابجایی‌های قائم و افقی خاکریز بررسی شده‌است، و در نهایت به بررسی کلاهک شمع و اثرات آن در عملکرد شمع‌های پیچی و کاهش میزان نشست‌های افقی و قائم خاکریز مطالعه می‌شود.

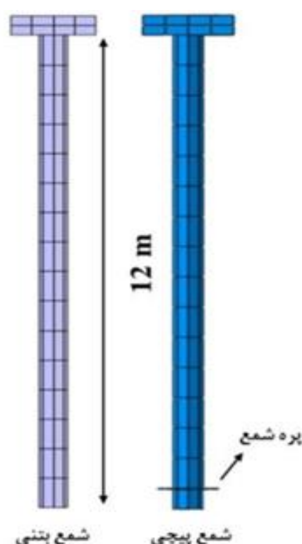
مدل‌سازی عددی

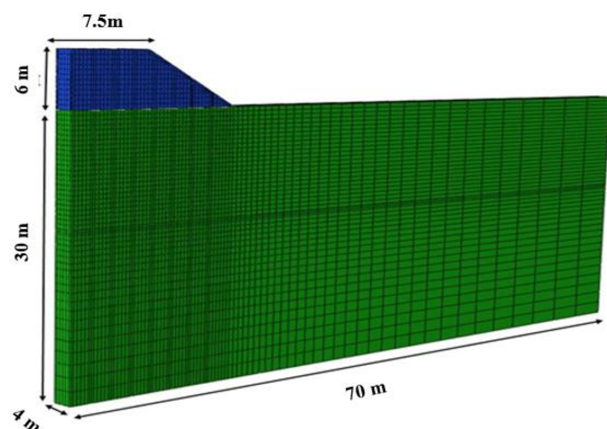
به‌منظور ساخت مدل خاکریز متکی بر شمع مورد مطالعه در این مقاله از نرم افزار المان محدود آباکوس (Abaqus) استفاده شده است. جهت بررسی دقیق مطالعات انجام شده، مدل‌های ایجاد شده به‌صورت سه‌بعدی می‌باشد و با توجه به تقارن مدل، تنها نیمی از مدل ساخته شده است.

هندسه مدل

در این مطالعه یک خاکریز با شـــیب ۱:۱/۵ با ارتفاع ۶ متر که دارای ۷/۵ متر طول تاج خاکریزی می‌باشـــد، برای بررســـی و مدل سازی انتخاب شده است. خاکریز ذکر شده بر روی یک لایه یکنواخت خاک نرم رسی با ارتفاع ۳۰ متر ساخته شده‌است. ابعاد خاک پی تا طول ۷۰ متر به‌منظور شـــرایط مرزی و کاهش اثر آن بر میدان‌های جابجایی و تنش و کرنش ســازه امتداد یافته است و بعد عمود بر صفحه به‌دلیل استفاده از یک ردیف شمع برابر با ۴ در نظر گرفته شده است [15]. از شمع‌های پیچی با شفت توخالی و شمع‌های بتنی توپر که روی آن یک کلاهک به ابعاد ۰/۵×۱/۵×۱/۵ متر، اسـتفاده شـده اسـت. در این مطالعه با توجه مطالعه کومار و همکاران برای مقایسه، طول شمع‌ها برابر در نظر گرفته شد و همچنین قطر شفت شمع پیچی با قطر شمع بتنی توپر نیز یکسان فرض شد [14]. شکل (۲) ابعاد هندسه شمع و خاکریز مدل شده در این مقاله را نشان می‌دهد.

همچنین مشخصات هندسی شمع‌ها به طور کامل در جدول (۱) خلاصـه شـده اسـت. شـرح روند مدلسـازی به‌ترتیب زیر می‌باشد که در گام اول تحلیل با استفاده از استپ ژئوا ستاتیک تنش‌های برجا به خاک وارد می شود و سپس شمع‌ها در خاک قرار می‌گیرند و جابجایی‌ها و تنش‌های ایجاد شده برابر با صفر می‌شـود. در گام بعدی، خاکریزی با ارتفاع ۶ متر در ۳ مرحله با اندازه‌های ۲ متر تحت وزن خاک خاکریز بارگذاری می‌شـــود و سپس در گام اخر، معادل تنش بارگذاری ترافیکی بر روی تاج خاکریز اعمال می‌شود.





شکل ۲ شبکه‌بندی مدل المان محدود و ابعاد استفاده شده در مد

جدول ۱ پارامترهای هندسی شمع‌های استفاده شده در مدل المان محدود

مشخصات هندسی	شمع پیچی	شمع بتنی
طول شمع(m)	۱۲	۱۲
قطر شفت(m)	۰/۵	۰/۵
ضخامت شفت(m)	۰/۰۱	–
قطر مارپیچ(m)	۱	–
ضخامت مارپیچ (m)	۰/۰۲۵	–

پارامتر مصالح و مدل رفتاری

جنس مصالح خاکریز عموما از جنس خاک‌های دانه‌ای است، که در این مطالعه خشک در نظر گرفته شده است. همچنین خاک پی از خاک رسی نرم با مشخصات ژئوتکنیکی ضعیف ساخته شده است. برای خاک رسی فرض شده است زهکشی رخ داده است و از پارامترهای زهکشی برای خاک استفاده می‌شود. مشخصات مهندسی متفاوتی برای خاک‌ها در مقالات مختلف گزارش شده است. پارامترها و ابعاد فرض شده برای شمع و خاک در این مطالعه از مقالات ذکر شده در سوابق تحقیق انتخاب شده‌است. پارامترهای مکانیکی و ژئوتکنیکی مورد استفاده برای خاک و شمع در این مطالعه به صورت کلی در جدول (۲) بیان شده است. برای مدل‌سازی خاک دانه‌ای و رسی از مدل رفتاری الاستو-پلاستیک موهر کلمب استفاده شده است و شمع‌های بتنی و پیچی به صورت الاستیک خطی مدل‌سازی شده است. رفتار مماسی سطح بین خاک و شمع با استفاده از مدل اصطکاکی کولمب و از نوع جریمه تعریف شده است که در آن حرکت نسبی مماسی تا زمانی که تنش برشی به یک مقدار بحرانی برسد برابر با صفر می‌باشد و زمانی که مقدار تنش برشی از مقاومت از مقاومت برشی سطح تماس و یا فشار سطح تماس بالاتر برود، لغزش رخ می‌دهد. ضریب اندرکنش بین خاک و شمع در این مطالعه برابر مقدار ۰/۷ در نظر گرفته شده است[16-17] .

جدول ۲ پارامترهای مصالح استفاده شده در مدل المان محدود

Material	E (MPa)	$\gamma(\frac{kN}{m^3})$	φ'	ν	C (KPa)
Embankment	15	20	30	0.3	5
Soft soil	5	18.4	22	0.3	8
Concrete	35000	2400	-	0.2	-
Steel	210000	7850	-	0.15	-

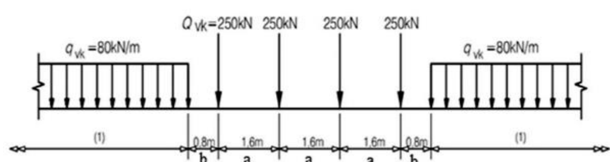
شبکه‌بندی و شرایط مرزی

شکل (۲) نمای خاکریز متکی بر شمع شبکه‌بندی شده در مدل المان محدود را نمایش می‌دهد. اندازه المان‌ها در اطراف شمع و سطح تماس خاک و خاکریز، ریزتر در نظر گرفته شده‌است.

برای مدلسازی شمع و خاک از المان‌های ۸ گرهی با انتگرال‌گیری کاهش یافته (C3D8R) استفاده شده است. به‌منظور کاهش اثر شرایط مرزی بر روی نتایج، مرزهای مدل امتداد یافته است. شرایط مرزی مدل به این صورت می‌باشد که مرز پایینی مدل، جابجایی‌ها در سه جهت ($U_X= U_Y=U_Z=0$) برابر با صفر تنظیم شده است. همچنین در جهت x در دو سمت مدل جابجایی برابر با صفر در نظر گرفته شده است ($U_X=0$) و در جهت y ، در دو سمت مدل نیز مقدار جابجایی برابر با صفر در نظر گرفته شده است ($U_Y=0$).

شبیه‌سازی بارگذاری ترافیکی

اثر حالت تنش-کرنش سازه تحت بار ترافیکی قطار به صورت سربار عمودی اعمال می‌شود، که به‌طور مساوی در عرض تراورس توزیع شده است. برای شبیه‌سازی بارگذاری از مدل قطار LM71 که در شکل (۳) آمده است باتوجه با نشریه ۲۷۹ مشخصات فنی و عمومی زیرسازی راه‌آهن استفاده شده است [3, 18-20].



شکل ۳ مدل بارگذاری قطار LM71

به‌منظور توزیع یکنواخت تنش در عرض تراورس از رابطه زیر برای تبدیل بارمحوری چرخ به بار یکنواخت گسترده، با توجه به‌مقادیر بارگذاری LM71 استفاده شده است :

$$q = \frac{4 \times Q_{vk}}{(3 \times a + 2 \times b) \times B} \quad (۱)$$

که در آن مقدار Q_{vk} بار متمرکزی است که مطابق با شکل مقدار آن ۲۵۰ کیلو نیوتون در نظر گرفته شده‌است. همچنین پارامترهای a و b؛ پارامترهای هندسی می‌باشند که مقدار آن باتوجه به نشریه ۲۷۹، به‌ترتیب ۱/۶ و ۰/۸ متر در نظر گرفته

شده‌است. همچنین B پارامتر نشان دهنده عرض بارگذاری می‌باشد. مقدار B در این مسئله برابر با ۲/۵ متر که معادل با طول استاندارد یک تراورس است در نظر گرفته شده است. α ضریب ضربه دینامیکی می‌باشد که روابط تجربی مختلفی برای آن گزارش شده است. برای تاثیر اثرات دینامیکی بارگذاری راه آهن، بار گسترده به‌دست آمده از رابطه (۱) در مقدار α ضرب می‌شود. در این مطالعه از استاندارد (AREA) (American Railway Engineering Association) متعلق به سازمان راه‌آهن آمریکا استفاده شده است که رابطه آن به صورت ذیل است:

$$\alpha=1+\frac{0.00521+V}{D_w} \quad (۲)$$

در رابطه‌ی (۲)، D_w قطر چرخ که مقدار آن ۱ متر و (km/h) V سرعت قطار می‌باشد که در این مطالعه ۱۶۰ فرض شده است.

اعتبارسنجی مدل‌سازی عددی

در این قسمت دو مدل با توجه به داده‌های میدانی گزارش شده از خاکریز متکی بر شمع و داده‌های آزمایشگاهی مربوط به بارگذاری یک شمع پیچی که در ابعاد واقعی آزمایش شده است، برای اعتبارسنجی مدل‌سازی عددی انتخاب شده است.

خاکریز متکی بر شمع

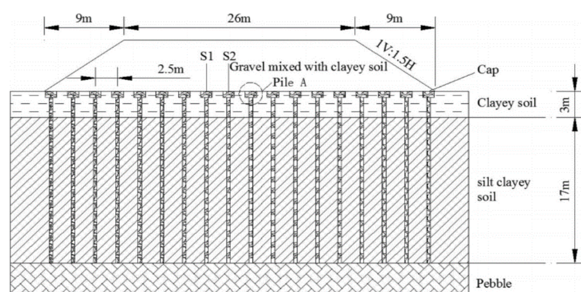
به‌منظور اطمینان از نحوه مدل سازی و برر سی نتایج حا صل از تحلیل‌های عددی، داده‌های گزارش شده از یک پروژه میدانی یک سیستم خاکریزی متکی بر شمع توسط چن و همکاران (۲۰۱۰) [8]، استفاده می‌شود. جدول (۳) و (۴) به‌ترتیب خصوصیات خاک و هندسه شمع مدل صحت سنجی را نشان می‌دهد. مدل عددی خاکریز با نرم افزار المان محدود آباکوس توسعه داده شده است و نتایج عددی با نتایج گزارش شده توسط داده‌های میدانی، مقایسه شد. شکل (۴) ابعاد خاکریزی و شمع‌ها و نحوه استقرار آنها را نشان می‌دهد. مقایسه نتایج تطابق خوبی را بین نتایج مدل عددی و داده‌های میدانی نشان می‌دهد. شکل (۵) میزان نشست در کلاهک شمع و شکل (۶) میزان نشست سطح خاک نرم پی مابین شمع‌ها را نسبت به زمان ساخت خاکریز نشان می‌دهد. . با توجه به اینکه خاکریز در یک دوره ۶۵ روزه احداث شده است، از کمی بعد از انتهای این زمان شکست در روند نمودارهای فوق مشاهده می‌شود.

جدول ۳ پارامترهای استفاده شده خاک در مدل‌های اعتبارسنجی

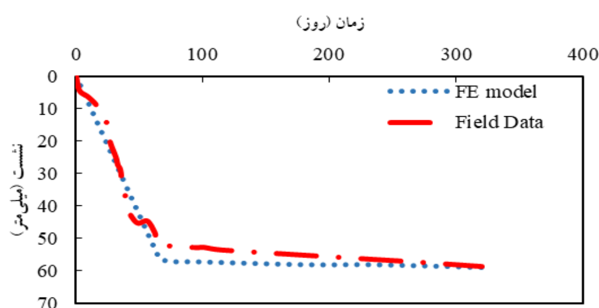
Pile embankment					
Material	E (MPa)	$\gamma(\frac{kN}{m^3})$	φ'	ν	C (KPa)
Embankment	21	15	32	0.3	0
ML	6.5	19.3	21	0.35	0
CL	2.4	16.7	24	0.3	0
GM	40	19.4	30	0.27	0
Helical pile					
Depth (m)	E (MPa)	$\gamma(\frac{kN}{m^3})$	φ'	ν	Ψ
0-5	50	20	24	0.3	10
5-9	50	20	21	0.3	10

جدول ۴ مشخصات هندسی شمع‌های استفاده شده در مدل‌های اعتبارسنجی

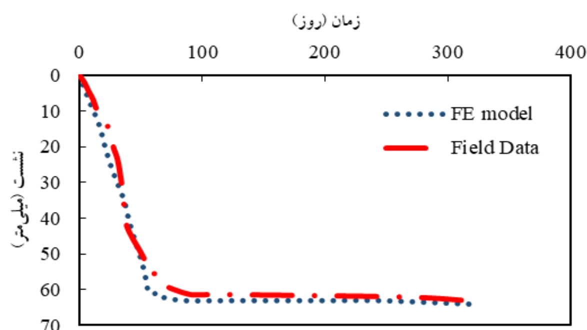
Parameter	Helical pile	Pile embankment
Shaft diameter (mm)	273	400
Depth of pile (m)	5.5	20
Helix diameter (mm)	610	-
Number of helix	1	-
Thickness of the shaft (mm)	9.3	50
Thickness of the helix (mm)	20	-



شکل ۴ مقطع عرضی از خاکریز بزرگ راه TJ



شکل ۵ نشست سر کلاهک شمع نسبت به زمان



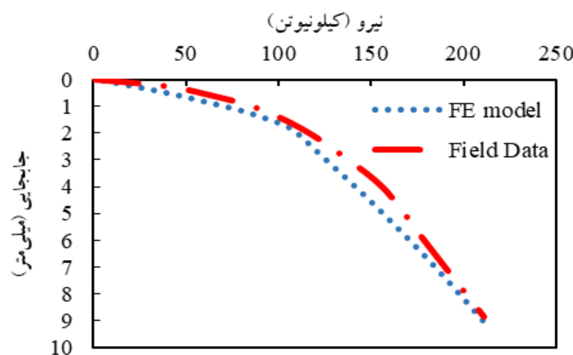
شکل ۶ نشست سطح خاک نسبت به زمان

شمع پیچی

همچنین برای اطمینان از نحوه صحیح مدل سازی شمع پیچی یک نمونه شمع پیچی(Site A - PA1) گزارش شده توسط الشربینی و الذگار (۲۰۱۳) [13] توسط نرم افزار آباکوس مدلسازی شد.

اکثر مطالعات عددی انجام شده به‌صورت یک دیسک استوانه‌ای مدل‌سازی شده است. علت اینکه یک مارپیچ ایده‌آل مدل‌سازی مشخصات خاک و شمع پیچی مدل‌سازی شده به ترتیب در جدول (۳) و (۴) قرار گرفته است.

مارپیچ شمع پیچی در نشده است این است که امکان مدل‌سازی در شرایط تقارن محوری فراهم شود و پیچیدگی مدل در ساخت و شبکه‌بندی کاهش یابد [10]. نمودار بار نشست شمع در شکل (۷) به نمایش درآمده است.



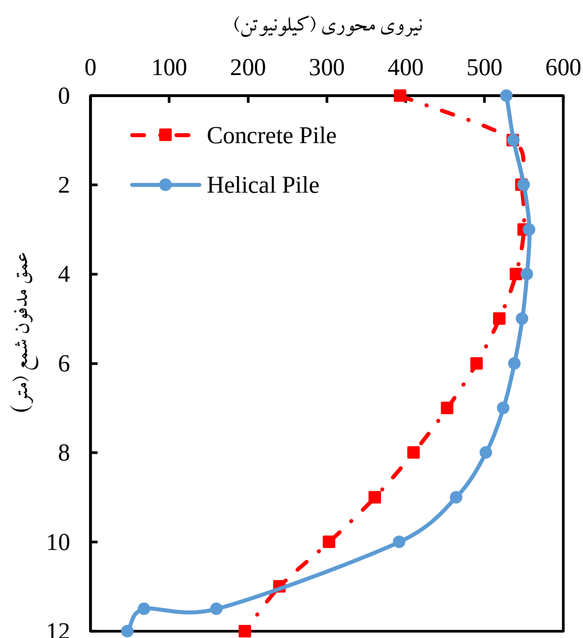
شکل ۷ مقایسه نتایج مدل عددی با داده‌های میدانی آزمایش PA-1

بحث و تحلیل نتایج المان محدود

در این قسمت به بررسی میزان جابجایی‌های قائم و افقی در یک سیستم خاکریزی متکی بر شمع پیچی و بتنی پرداخته شده است و توزیع نیروی محوری در راستای عمق مدفون شمع پیچی و بتنی مقایسه شده است و با تعریف پارامتر نسبت کاهش تنش میزان ساز و کار انتقال بار بین این دو شمع مقایسه شده است. همچنین اثر کلاهک بر روی شمع پیچی مطالعه می‌شود.

مقایسه عملکرد شمع‌های بتنی و پیچی

گروه شمع‌های بتنی و پیچی در یک خاکریز متکی بر شمع مطالعه شده‌است، شمع‌ها در فواصل ۲ متری از یکدیگر مدل‌سازی شده‌اند و تمام پارامترها و ابعاد خاک در مدل به صورت یکسان فرض شده است و فقط نوع شمع تغییرکرده است. همچنین برای مدل‌سازی بار راه‌آهن میزان تنش یکنواخت به مقدار ۱۱۵ کیلونیوتون بر متر مربع بر روی سطح خاکریز توزیع شده است. شکل (۸) میزان توزیع نیروی محوری در راستای عمق مدفون شمع پیچی و بتنی نزدیک به مرکز خاکریز را نشان می‌دهد. شکل (۸) نشان می‌دهد شمع پیچی ظرفیت باربری بیشتری را در سر شمع و جداره شمع نسبت به شمع بتنی دارد و باعث بهبود سیستم خاکریزی می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد با توجه به سطح مقطع کوچک‌تر شمع پیچی در مقایسه با شمع بتنی در انتهای شمع، ظرفیت باربری نوک در شمع بتنی بیشتر است. اما با توجه به رفتار اصطکاکی شمع‌ها این موضوع تاثیری در مقادیر نشست خاکریز و خاک پی نمی‌گذارد و بیشترین تاثیر را ظرفیت جداری شمع در کاهش نشست‌ها دارد.



شکل ۸ توزیع نیروی محوری در راستای عمق مدفون شمع

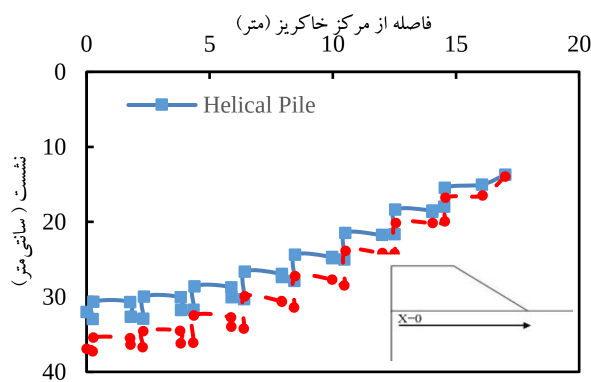
میزان نشست در سطح خاک پی در شکل (۹) نشان داده شده است؛ نتایج نشان می‌دهد که شمع‌های پیچی در مقایسه با شمع‌های بتنی توپر عملکرد موثرتری در میزان کنترل نشست‌ها بر روی سطح خاک پی دارند. بیشترین مقدار نشست برای مرکز خاکریز متکی بر شمع می‌باشد و با فاصله گرفتن از مرکز مدل هم میزان نشست خاک پی کاهش پیدا می‌کند و هم میزان اختلاف نشست بین شمع‌های بتنی و پیچی کاهش پیدا می‌کند که می‌توان نتیجه گرفت با کاهش تنش وارده ناشی از وزن خاک و بارگذاری ترافیکی، تفاوت عملکرد بین شمع‌های پیچی و بتنی نیز کاهش پیدا می‌کند.

همچنین میزان نشست‌های افقی و قائم خاکریز دانه‌ای در توضیح عملکرد شمع‌های بتنی و پیچی مقایسه شده است. شکل (۱۰) کانتور تغییرات نشست قائم و شکل (۱۱) کانتور تغییرات جابجایی افقی در خاکریز دانه‌ای را نشان می‌دهد. بیشترین میزان نشست عمودی در خاکریز در زیر بار ترافیکی و کمترین مقدار در پنجه خاکریز رخ داده است. نتایج نشان می‌دهد شمع پیچی عملکرد بهتری را برای کنترل میزان نشست‌ها در طول خاکریز دارد به طوری که بیشترین میزان نشست برای خاکریز با شمع بتنی ۳۹ سانتی متر و برای شمع پیچی این مقدار به حدود ۳۵ سانتی متر می رسد. در مقایسه کانتورهای جابجایی افقی در خاکریز نیز شمع‌های پیچی در مقایسه با شمع‌های بتنی عملکرد مثبتی دارند. به طوری که گوه گسیختکی کوچکتری در بالای شیب خاکریز متکی بر شمع پیچی نسبت به خاکریز متکی بر شمع بتنی تشکیل می‌شود.

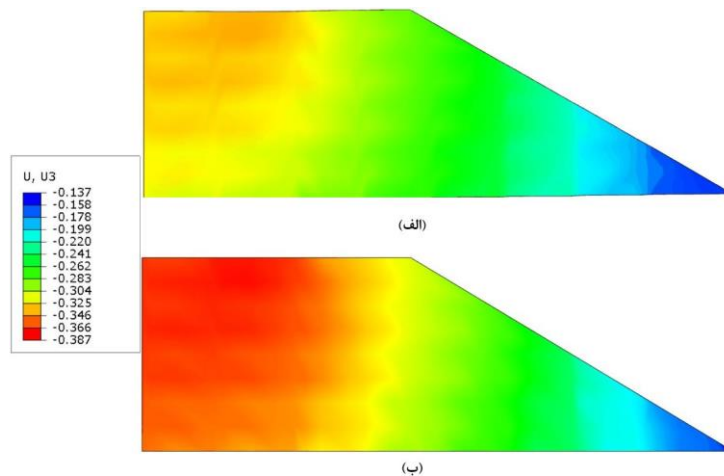
در ادامه مکانیزم انتقال بار در خاکریزهای متکی به شمع با نسبت قوس زدگی (Soil arching Ratio) (SAR) تعریف شده است. این نسبت عددی بین ۰ و ۱ است، که مقدار SAR=0، نشان می‌دهد ساز و کار انتقال بار به‌صورت کامل رخ داده است و SAR=1 نشان می‌دهد که ساز و کار انتقال بار رخ نداده است و تمام بار خاکریزی بر روی خاک زیر خاکریز وارد می‌شود [21]:

$$\mathrm{SAR}=\frac{\sigma_s}{\gamma_e H+q} \qquad (۳)$$

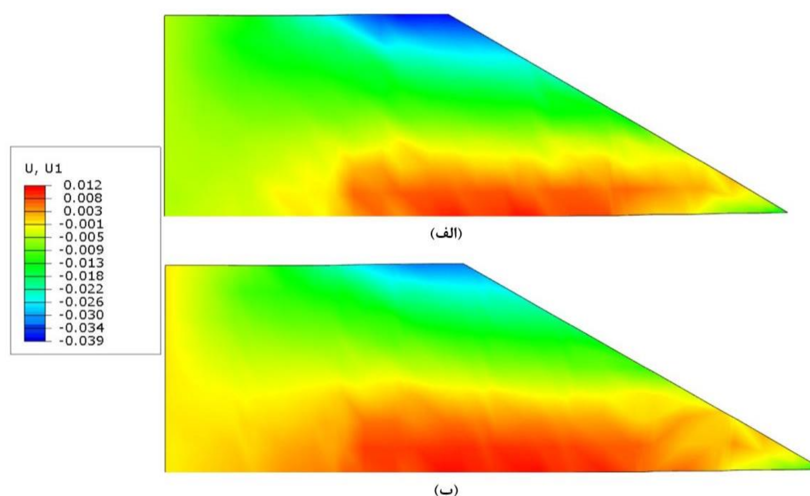
در رابطه (۳) بار گسترده به‌صورت یکنواخت روی کل سطح خاکریز در نظر گرفته می‌شود؛ در این مقاله به دلیل اینکه بار ترافیکی شبیه‌سازی شده بر روی مقطعی از خاکریز وارد می‌شود و به صورت یکنواخت به طول تاج خاکریز اعمال نمی‌شود، از آن صرف نظر شده است و فقط وزن لایه‌های خاکریزی در نظر گرفته شده است.



شکل ۹ نشست خاک زیرخاکریز از فاصله مرکز خاکریز تا انتهای خاکریز

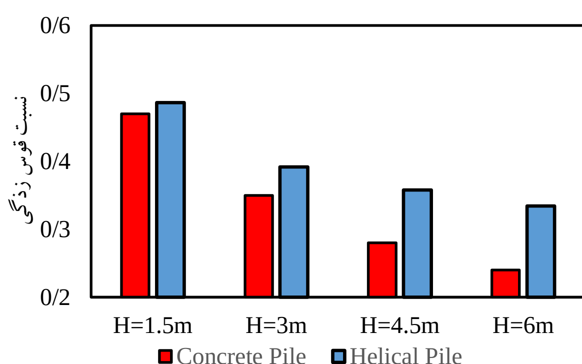


شکل ۱۰ کانتور جابجایی قائم خاکریز دانه ای: (الف) شمع پیچی، (ب) شمع بتنی



شکل ۱۱ کانتور جابجایی افقی خاکریز دانه‌ای: (الف) شمع بتنی، (ب) شمع پیچی

شکل (۱۲) میزان نسبت کاهش تنش برای شمع‌های بتنی و پیچی را با در نظر گرفتن اثر شدت بارگذاری که، ناشی از وزن خاکریز در نظر گرفته شده است را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد شمع‌های بتنی بازده بیشتری را نسبت به شمع‌های پیچی دارند بر خلاف اینکه نتایج صفحه قبل نشان می‌دهد شمع‌های پیچی در کنترل نشست‌ها عملکرد قابل توجهی دارند. علت این موضوع می‌تواند به دلیل سطح مقطع بیشتر شمع‌های بتنی توپر نسبت به شمع‌های پیچی باشد که توزیع یکنواخت‌تر تنش در روی سطح خاک پی را ممکن می‌سازد. علاوه بر این می‌توان نتیجه گرفت لزوم شکل گرفتن پدیده قوس زدگی و کامل شدن درجه انتقال بار خاکریز به شمع‌ها و کاهش فشار از روی سطح خاک پی، ارتباط مستقیمی با میزان کاهش نشست‌ها در یک سیستم خاکریز متکی بر شمع ندارد. نتایج شکل (۱۲) نشان می‌دهد نسبت کاهش تنش در سیستم، با افزایش ارتفاع خاکریزی افزایش پیدا می‌کند. علت این پدیده این است که در ارتفاع‌های کمتر خاکریزی، وزن خاکریز مقاومت برشی کافی را ایجاد نمی‌کند تا قوس‌زدگی رخ دهد و فشار از روی خاک پی بین شمع‌ها کاهش یابد، بنابراین با افزایش ارتفاع خاکریزی تنش وارده افزایش می‌یابد و مقاومت برشی کافی برای ایجاد قوس‌زدگی و کاملتر شدن ساز و کار انتقال بار شکل می‌گیرد. همچنین اختلاف نمودارها حاکی از آن است که هرچه مقدار خاکریزی افزایش پیدا کند در نهایت درجه قوس زدگی به یک مقدار آستانه می‌رسد و اثر آن کاهش پیدا می‌کند. نکته حائز اهمیت دیگر این است که با افزایش میزان قوس زدگی تفاوت میزان بار وارد بر شمع‌های پیچی و بتنی نیز افزایش پیدا می‌کند بطوریکه این تفاوت در ۱/۵ متر خاکریزی ۴ درصد و در انتهای خاکریزی در ارتفاع ۶ متر به میزان ۲۷ درصد می‌رسد.



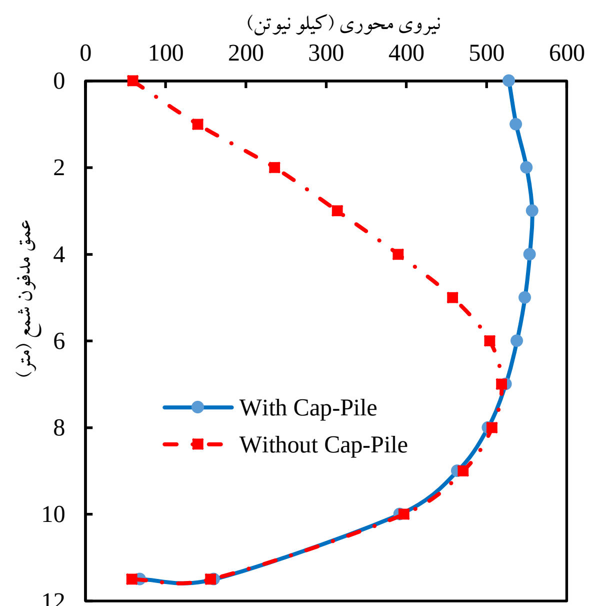
شکل ۱۲ مقایسه نسبت کاهش تنش با توجه به نوع شمع

مقایسه عملکرد شمع‌های پیچی با در نظر گرفتن کلاهک و عدم وجود کلاهک

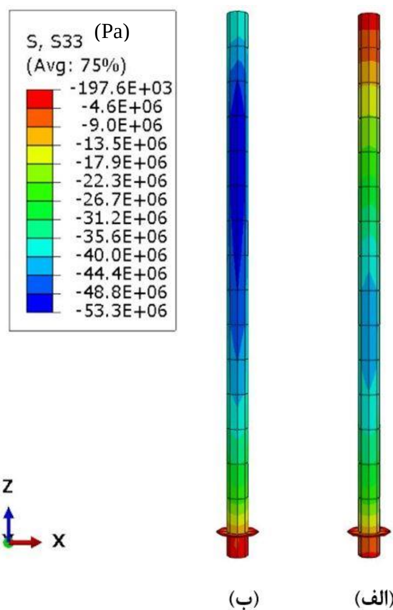
در این قسمت اثر کلاهک بر روی یک سیستم خاکریزی متکی به شمع پیچی مورد مطالعه قرار گرفته است، ابعاد شمع یکسان در نظر گرفته شده است و تمامی شرایط مدلسازی و بارگذاری و پارامترهای خاک یکسان فرض شده است. شکل (۱۳) تفاوت توزیع نیروی محوری در راستای شمع را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که کلاهک بتنی باعث انتقال بهتر تنش خاکریز و بارگذاری به سر شمع می‌شود. به‌همین جهت وجود کلاهک باعث بهتر شدن مکانیزم انتقال بار به سر شمع می‌شود که در نتیجه آن تنش کمتری بر روی خاک پی وارد می‌شود که باعث

کنترل بهتر در کاهش نشست‌ها و جابجایی‌ها می‌شود. همچنین نتایج نشان داده شده در کانتور تغییرات تنش در شمع در شکل (۱۴) نشان می‌دهد که جداره شمع نقش اصلی در ظرفیت باربری شمع‌ها را نسبت به نوک و سر شمع عهده‌دار می‌باشد. در تحلیل شکل (۱۴) می‌توان اضافه کرد که به‌دلیل نشست تفاضلی بیشتری که در حالت بدون کلاهک رخ می‌دهد اصطکاک منفی در بخش پایینی شمع رخ می‌دهد در حالیکه برای حالت وجود کلاهک، شکم زدگی توزیع تنش و ایجاد اصطکاک منفی در بخش بالایی شمع رخ می دهد. که این موضوع بیانگر این است که از ظرفیت جداره شمع بیشتر استفاده شده است.

جابجایی‌های قائم و افقی در خاکریز نیز به هرچه بهتر توزیع شدن تنش در شمع و کاهش تنش فشاری بر روی سطح خاک پی بستگی دارد. شکل (۱۵) تغییرات قائم خاکریز را برای شمع پیچی در دو حالت کلاهک‌دار و بی‌کلاهک نشان می‌دهد. وجود کلاهک بر روی شمع‌ها می‌تواند نشست را تا مقدار قابل توجهی کاهش دهد به‌طوری که در مدل المان محدود ساخته شده در شرایط یکسان، وجود کلاهک به تنهایی می‌تواند مقدار نشست‌های قائم را در حدود ۸ سانتی متر کاهش دهد. با دور شدن از مرکز خاکریز و کاهش تنش فشاری وارده بر روی شمع و خاک پی تغییرات نشست تفاوت چندانی نخواهد کرد و می‌توان نتیجه گرفت استفاده از کلاهک بر روی شمع برای ردیف شمع‌های انتهایی کم اثر است.

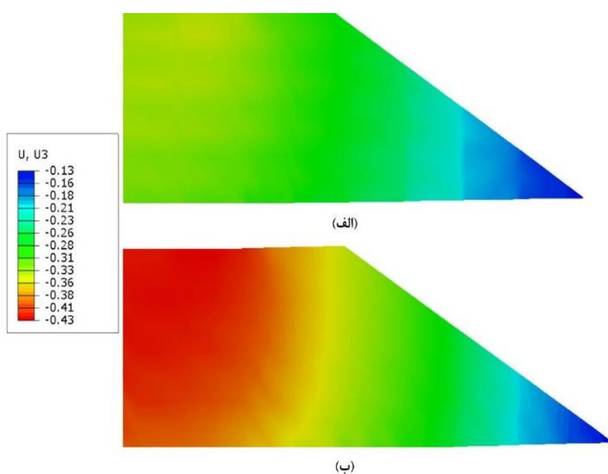


شکل ۱۳ توزیع نیروی محوری در راستای عمق مدفون شمع پیچی

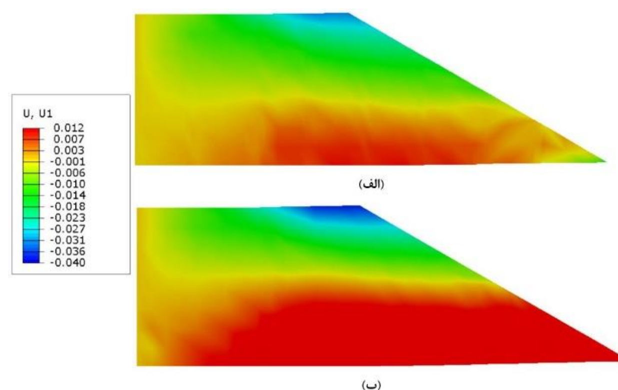


شکل ۱۴ کانتور تنش های عمودی جداره شفت شمع: (الف) شمع بی‌کلاهک، (ب) شمع کلاهک‌دار

همچنین در تغییر شکل‌های افقی که در شکل (۱۶) نشان داده شده است، کلاهک اثر مثبتی دارد به طوری که هم میزان جابجایی افقی در پنجه خاکریز و هم گوه گسیختگی تشکیل شده در بالای خاکریز میزان جابجایی‌ها مقدار کمتری می‌باشد. از نتایج ارائه شده می‌توان نتیجه گرفت وجود کلاهک بتنی می‌تواند عملکرد و بازدهی سیستم را افزایش دهد و میزان نشست های کلی و تفاضلی را به میزان قابل توجهی کاهش دهد.



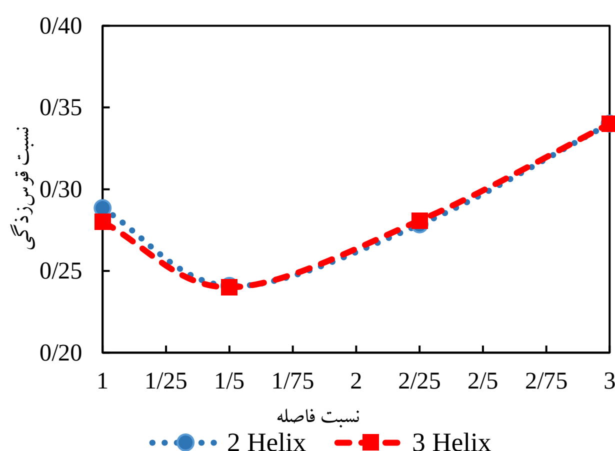
شکل ۱۵ کانتور تغییرات شکل قائم خاکریز دانه‌ای: (الف) شمع کلاهک‌دار، (ب) شمع بی‌کلاهک



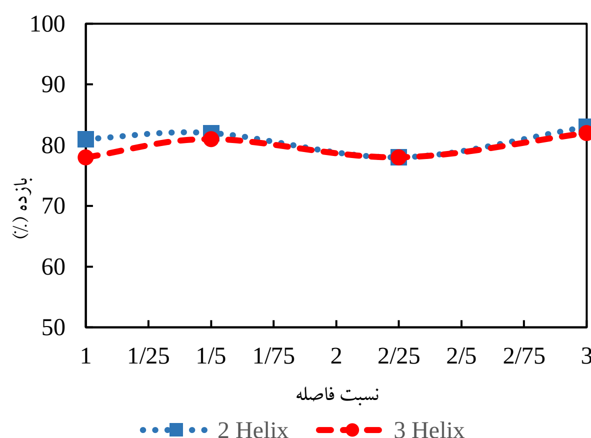
شکل ۱۶ کانتور تغییرات شکل قائم خاکریز دانه‌ای: (الف) شمع کلاهک‌دار، (ب)شمع بی‌کلاهک

بررسی اثر تعداد و فاصله بین پره‌ها بر عملکرد خاکریزهای متکی بر شمع پیچی

در این قسمت تاثیر تعداد پره‌های متصل به شمع پیچی با فواصل مختلف برای بررسی ساز و کار انتقال بار و نشست در یک سیستم خاکریز متکی بر شمع پیچی مطالعه می‌شود. فاصله بین پره‌های شمع پیچی با نسبت فاصله (Spacing Ratio) مشخص شده است که برابر با نسبت اندازه فاصله دو پره به قطر پره است. چهار نسبت فاصله ۱، ۱/۵، ۲/۲۵ و ۳ به‌منظور مطالعه انتخاب شده است و برای تعداد پره‌ها دو حالت ۲ و ۳ پره متصل به بدنه شمع فرض شده است. میزان قوس‌زدگی در شکل (۱۷) نشان می‌دهد تعداد ۲ یا ۳ پره متصل به شمع، تاثیری بر درجه قوس خاکریز ندارد و بهترین حالت در نسبت فاصله ۱/۵ رخ می‌دهد که برابر با مقدار ۰/۲۴ است. با افزایش نسبت فاصله، مقدار نسبت قوس‌زدگی افزایش می‌یابد و با کاهش این مقدار در نسبت نیز ۱ این مقدار افزایش می‌یابد، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت نسبت فاصله ۱/۵ حالت بهینه برای کنترل نسبت قوس‌زدگی در خاک‌های رسی نرم است. نسبت قوس‌زدگی در حالت استفاده از شمع پیچی تک پره برابر با ۰/۳۲ است که نسبت به شمع پیچی ۲ پره با نسبت فاصله ۱/۵، حدود ۲۵ درصد افزایش داشته است، درحالی‌که نسبت به شمع پیچی دو پره با نسبت فاصله ۳ حدود ۵/۸۸ درصد کاهش داشته است. بازده سر شمع در شکل (۱۸) رسم شده است، نتایج نشان می‌دهد بیشترین مقدار بازده در نسبت فاصله ۱/۵ رخ می‌دهد. همچنین نتایج مانند نسبت قوس‌زدگی، عملکرد مثبت شمع ۲ پره در برابر شمع ۳ پره را در تمامی حالت‌ها نشان می‌دهد. میزان تغییرات بازده برای شمع پیچی دو پره با نسبت فاصله ۱/۵ نسبت به شمع پیچی تک پره، ۱/۲ درصد بیشتر است. همچنین میزان تغییرات شمع پیچی دو پره نسبت به شمع پیچی سه پره با نسبت فاصله ۱/۵ برابر با ۱/۲ درصد است.



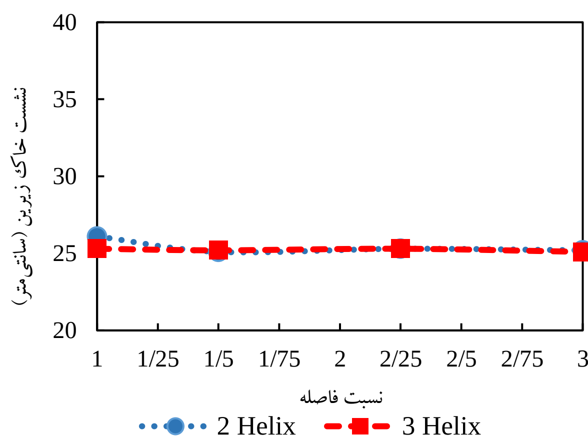
شکل ۱۷ نسبت کاهش تنش برای نسبت فاصله‌های مختلف در شمع‌های پیچی دوپره و سه پره



شکل ۱۸ بازده سر شمع برای نسبت فاصله‌های مختلف شمع پیچی دوپره و سه پره

بیشترین مقدار نشست خاک زیرین در شکل (۱۹) نشان داده شده است، نتایج حاکی از آن است که کمترین میزان نشست برای شمع دو پره با نسبت فاصله ۱/۵ و شمع سه پره با نسبت فاصله ۳ به‌دست می‌آید که برابر با مقدار نشست شمع پیچی تک پره است. از نتایج بدست‌آمده می‌توان نتیجه گرفت به‌دلیل رفتار

اصطکاکی شمع، جداره بدنه شمع نقش مهمی در کنترل میزان نشست‌ها در یک سیستم خاکریز متکی بر شمع دارد و اضافه کردن پره شمع تاثیری در کنترل میزان نشست‌ها در عملکرد کلی سیستم ندارد و حتی ممکن است شرایط را بحرانی کند.



شکل ۱۹ نشست خاک زیرین برای نسبت فاصله‌های مختلف شمع پیچی دو پره و سه پره

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر به بررسی المان محدود خاکریزهای متکی به شمع های پیچی و بتنی توپر و اثر وجود کلا هک بر روی شمع‌های پیچی با استفاده از نرم افزار آباکوس پرداخته شد. بعد از راستی آزمایی نتایج مدل عددی بر روی یک خاکریز متکی بر شمع‌های بتنی و مدل بار- نشست شمع پیچی به بررسی تفاوت شمع‌های پیچی و بتنی بر روی عملکرد سیستم تحت شرایط یکسان بارگذاری و پارامتری مهندسی خاک پرداخته شد. از مهمترین نتایج مطالعه حاضر می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. شمع‌های پیچی در کنترل نشست های خاکریز و خاک پی عملکرد بهتری را نسبت به شمع‌های بتنی نشان می‌دهد به‌طوریکه میزان نشست میانه خاکریز به میزان ۱۰ درصد کاهش می‌یابد و با فاصله گرفتن از مرکز خاکریز، این تفاوت کاهش پیدا می‌کند.

۲. بررسی تنش های وارده بر روی سطح خاک پی که با نسبت کاهش تنش در این مطالعه نشان داده شده است حاکی از آن است که شمع‌های بتنی به دلیل سطح مقطع بیشتری که نسبت به شفت شمع پیچی دارد که به صورت لوله‌ای می‌باشد، باعث بهتر شکل گرفتن مکانیزم انتقال بار در خاکریزی می‌شود.

۳. کنترل نشست‌های افقی و قائم در یک سیستم خاکریزی ارتباط مستقیمی با بهبود مکانیزم انتقال بار ندارد.

۴. با افزایش ارتفاع خاکریزی مکانیزم انتقال بار بهبود می‌یابد و هرچه این ارتفاع افزایش پیدا کند درصد تغییرات آن کاهش پیدا می‌کند.

۵. ا ستفاده از کلاهک بر روی شمع‌های پیچی باعث بهتر توزیع شدن نیرو در شمع می شود. همچنین کلاهک به دلیل انتقال بهتر تنش‌ها به شمع و کاهش فشار از روی خاک پی، میزان نشست‌های قائم را به میزان ۱۹ در صد نسبت به حالت عدم وجود کلاهک، کاهش می‌دهد.

۶. اضافه کردن پره به بدنه شمع در بهبود عملکرد خاکریزهای متکی بر شمع پیچی تاثیرگذار نمی‌باشد.و تنها ساز و کار انتقال بار در نسبت فاصله ۱/۵ بهبود می‌یابد.

فهرست علائم

a	پارامتر هندسی مدل بارگذاری LM71، m
b	پارامتر هندسی مدل بارگذاری LM71، m
Q_{vk}	بار متمرکز مدل بارگذاری LM71، kN
B	عرض تراورس، m
V	سرعت حرکت قطار، Km/h
D_W	قطر چرخ قطار، m
E	بازده
S	فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها، m
S'	فاصله لبه‌ی کلاهک شمع‌ها، m
H	ارتفاع خاکریز، m
γ_e	وزن مخصوص خاکریز، kN/m^2
σ_s	تنش عمودی وارد بر خاک پی، kN/m^2
q	بارگذاری یکنواخت بر روی تاج خاکریزی، kN

سپاسگزاری

مراجع

[1] J. Han and M. Gabr, "Numerical analysis of geosynthetic-reinforced and pile-supported earth platforms over soft soil," *geotechnical geoenvironmental engineering*, vol. 128, no. 1, pp. 44-53, 2002. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:1(44)

[2] T. A. Pham and D. Dias, "3D numerical study of the performance of geosynthetic-reinforced and pile-supported embankments," *Soils and Foundations*, vol. 61, no. 5, pp. 1319-1342, 2021. https://doi.org/10.1016/j.sandf.2021.07.002

[3] N. K. Meena, S. Nimbalkar, B. Fatahi, and G. Yang, "Effects of soil arching on behavior of pile-supported railway embankment: 2D FEM approach," *Computers and Geotechnics*, vol. 123, pp. 103601, 2020. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103601

[4] J. T. Wu, X. Ye, J. Li, and G. W. Li, "Field and numerical studies on the performance of high embankment built on soft soil reinforced with PHC piles," *Computers and Geotechnics*, vol. 107, pp. 1-13, 2019. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.11.019

[5] A. Bhasi and K. Rajagopal, “Numerical study of basal reinforced embankments supported on floating/end bearing piles considering pile–soil interaction,” *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 43, no. 6, pp. 524-536, 2015. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.05.003

[6] Y. Jiang, J. Han, and G. Zheng, "Numerical analysis of a pile–slab-supported railway embankment," *Acta Geotechnica*, vol. 9, no. 3, pp. 499-511, 2014. https://doi.org/10.1007/s11440-013-0285-9

[7] L. Briançon and B. Simon, "Performance of Pile-Supported Embankment over Soft Soil: Full-Scale Experiment," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 138, no. 4, pp. 551-561, 2012. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000561

[8] R. P. Chen, Z. Z. Xu, Y. M. Chen, D. S. Ling, and B. Zhu, "Field Tests on Pile-Supported Embankments over Soft Ground," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 136, no. 6, pp. 777-785, 2010. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000295

[9] G. Spagnoli and C. de Hollanda Cavalcanti Tsuha, "A review on the behavior of helical piles as a potential offshore foundation system," *Marine Georesources & Geotechnology*, vol. 38, no. 9, pp. 1013-1036, 2020. https://doi.org/10.1080/1064119X.2020.1729905

[10] M. Alwalan and A. Alnuaim, "Axial Loading Effect on the Behavior of Large Helical Pile Groups in Sandy Soil," *Arabian Journal for Science and Engineering*, no. 4, 2022. https://doi.org/10.1007/s13369-021-06422-9

[11] H. A. Perko, *Helical piles: a practical guide to design and installation*. John Wiley & Sons, 2009. [E-book]

[12] M. J. Nowkandeh and A. J. Choobbasti, "Numerical study of single helical piles and helical pile groups under compressive loading in cohesive and cohesionless soils," *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 80, no. 5, pp. 4001-4023, 2021. https://doi.org/10.1007/s10064-021-02158-w

[13] Z. H. Elsherbiny and M. H. El Naggar, "Axial compressive capacity of helical piles from field tests and numerical study," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 50, no. 12, 2013. https://doi.org/10.1139/cgj-2012-0487

[14] P. P. Kumar, S. Patra, S. Haldar, M. J. Brown, J. A. Knappett, and Y. U. Sharif, "3D numerical analysis of screw pile subjected to axial compressive and lateral load," in *Indian Geotechnical Conference (IGC 2021)*, 2021. https://doi.org/10.1007/978-981-19-6998-0_8

[15] F. Azizi, *Applied Analyses in Geotechnics: CRC Press*. 1999.[E-book]

[16] M. Khanmohammadi and K. Fakharian, "Evaluation of performance of piled-raft foundations on soft clay: A case study," *Geomechanics and Engineering*, vol. 14, no. 1, pp. 43-50, 2018. https://doi.org/10.12989/gae.2018.14.1.043

[17] K. Fakharian and M. Khanmohammadi, "Evaluation of the effect of geometric characteristics of a piled-raft on its behavior on soft clay under drained conditions," Sharif Civil Engineering Journal, vol. 29, no. 2, pp. 71-76, 2013.

[18] G. Lazorenko, A. Kasprzhitskii, A. Kukharskii, A. Kochur, and V. Yavna, "Failure analysis of widened railway embankment with different reinforcing measures under heavy axle loads: A comparative FEM study," Transportation Engineering, vol. 2, pp. 100028, 2020. https://doi.org/10.1016/j.treng.2020.100028

[19] M. Esmaeili, B. Naderi, H. K. Neyestanaki, and A. Khodaverdian, "Investigating the effect of geogrid on stabilization of high railway embankments," *Soils and Foundations*, vol. 58, no. 2, pp. 319-332, 2018. https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.02.005

[20] Technical and general specifications of railway infrastructure, No 279. Tehran: Management and Planning Organization, 2004 (in Persian)

[21] S. W. Abusharar, J.-J. Zheng, B.-G. Chen, and J.-H. Yin, "A simplified method for analysis of a piled embankment reinforced with geosynthetics," *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 27, no. 1, pp. 39-52, 2009. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2008.05.002

.